

### EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR FOTOSINTETICAMENTE ATIVA PARA DIFERENTES COBERTURAS DE CÉU

A. Dal Pai<sup>1</sup>, J. F. Escobedo<sup>2</sup>, E. Dal Pai<sup>3</sup>, B. V. H. N. Paula<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Bioprocessos. Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA/UNESP. R. José Barbosa de Barros, 1780. CEP 18610-307. Botucatu/SP/Brasil. Tel +55143880-7162. E-mail: adalpai@fca.unesp.br

<sup>2, 3, 4</sup>Departamento de Engenharia Rural /FCA/UNESP. Botucatu/SP/Brasil.

**Resumo:** O objetivo do trabalho foi propor equações de estimativa da radiação solar fotosinteticamente ativa em função da radiação solar global para diferentes coberturas de céu. A base de dados de irradiâncias global e fotossinteticamente ativa de 2004 foi cedida pelo Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu-UNESP. As equações de estimativa foram obtidas por meio de regressão linear para 4 condições diferenciadas: todas as condições de cobertura de céu; cobertura de céu nublada; cobertura de céu parcialmente nublada e; cobertura de céu aberto. A verificação de desempenho das equações de estimativa foi realizada a partir da análise do coeficiente de determinação  $R^2$ . Os resultados mostram percentuais diferenciados da radiação solar fotossinteticamente ativa em função da radiação solar global para as diferentes coberturas de céu: 46,25% para todas as condições de cobertura de céu; 50,06% para cobertura de céu nublado; 47,05% para cobertura de céu parcialmente nublado e; 45,64% para cobertura de céu aberto.

**Palavras-chave:** radiação solar, radiação fotossinteticamente ativa, equações de estimativa, clorofila.

### INTRODUÇÃO

A fonte de energia que sustenta toda a vida na Terra provém do Sol, cuja responsabilidade, direta ou indireta, vai desde a produção de energia hidrelétrica, termelétrica, eólica e solar, passando pela cadeia nutritiva do ecossistema até a produção de combustíveis através da queima dos produtos originados da produção da biomassa (biogás, carvão).

A radiação solar é uma forma de energia limpa e barata e constitui a principal fonte de energia para processos físicos, biológicos e químicos, tais como fotossíntese vegetal, evapotranspiração, crescimento de culturas, dentre outras. Serve também como parâmetro para avaliação de riscos de incêndios florestais, modelos de simulação hidrológica e modelos matemáticos de processos naturais. Com uma base de dados de qualidade, é possível dimensionar sistemas para armazenamento e conversão, principalmente em arquitetura (conforto térmico) e em aplicações de conversão fototérmica, fotovoltaica e de biomassa. Em escala mundial, países emergentes e em desenvolvimento tem criado e desenvolvido políticas públicas para melhor aproveitamento dessa forma de energia, visto que a mesma tem impacto em setores estratégicos como economia e meio ambiente.

Ao penetrar na atmosfera, a radiação solar interage com seus constituintes por meio dos processos de absorção, reflexão e difusão, e o montante incidente em superfície recebe o nome de radiação solar global. Comparando-se as quantidades de radiação solar no topo da atmosfera e na superfície, é possível inferir sobre os constituintes atmosféricos que atenuam a radiação e, portanto, recuperar informações sobre nebulosidade, vapor d'água e poluição locais. Portanto, mudanças nos níveis de radiação solar podem provocar mudanças climáticas drásticas, com impactos significativos na fauna e flora.

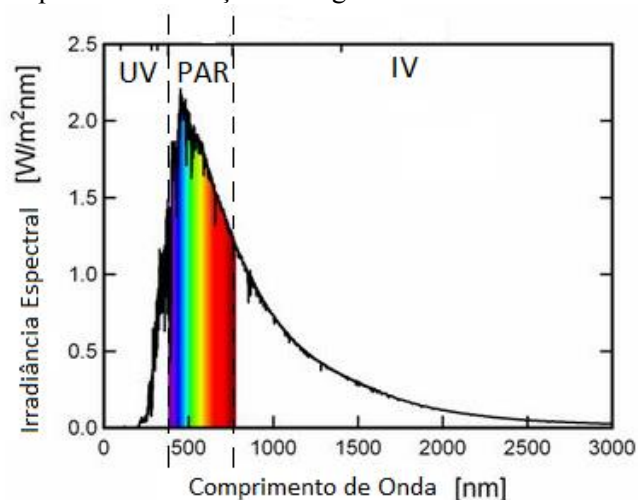
---

<sup>1</sup> Prof. Doutor (FCA/UNESP)

<sup>2</sup> Prof. Livre Docente (FCA/UNESP)

<sup>3</sup> Prof. Doutor (FCA/UNESP)

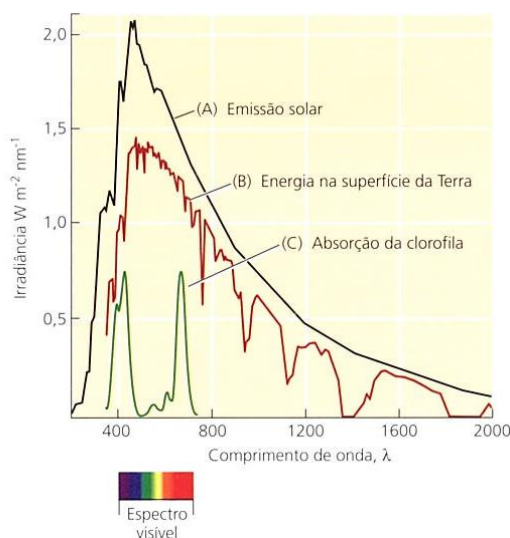
A radiação solar global é a componente solar mais comumente medida mundialmente por questões financeiras e práticas, e está delimitada entre os comprimentos de onda de 300nm a 5000nm. Esta radiação compreende parte do ultravioleta do espectro (UV), com comprimentos de onda entre 300nm e 400 nm; espectro visível, também conhecida por Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR – Photosynthetically Active Radiation), com comprimentos entre 400nm e 700nm; e parte do infravermelho próximo ao espectro visível (IV<sub>P</sub>), entre 700nm e 5000nm (WMO, 1983). A Figura 1 mostra o espectro de radiação solar. Várias medidas experimentais foram obtidas com a finalidade de determinar a composição espectral da radiação solar global.



*Figura 1. Espectro da radiação solar com as componentes ultravioleta (UV), visível (PAR) e infravermelha IV.*

Especificamente em relação à flora, a componente solar espectral de interesse é a Radiação Solar Fotossinteticamente Ativa (PAR), compreendida no intervalo de comprimento de onda de 400nm a 700nm (espectro visível) (MCCREE, 1972) pelo fato desta estar intimamente ligada ao processo de fotossíntese, à modelagem de processos vegetais (BAUERLE et al, 2004), à produção de biomassa (WU et al, 2011) e à iluminação natural no interior de estufas.

A PAR é a radiação que ativa os pigmentos fotossintéticos nas plantas, permitindo que as mesmas absorvam a energia radiante do sol e a convertam em energia química por meio do processo de fotossíntese. A Figura 2 mostra o espectro de absorção da clorofila, com destaque para as regiões espectrais do azul e vermelho responsáveis pela maior parte de absorção. A região espectral do verde é fracamente absorvida pelos pigmentos fotossintéticos, conferindo às folhas sua coloração verde característica.



*Figura 2. Espectros de emissão solar, na superfície da Terra e de absorção da clorofila*

Essa energia química é armazenada nas plantas na forma de carboidratos, servindo de alimento para herbívoros e indiretamente para carnívoros e onívoros. O conhecimento dos níveis incidentes da PAR no dossel vegetativo auxilia no entendimento e na modelagem de processos de respiração, evapotranspiração e estresse hídrico vegetal (ZANETTI, et al, 2008).

Portanto, o objetivo do trabalho foi propor equações de estimativa da radiação solar fotossinteticamente ativa em função da radiação solar global para diferentes coberturas de céu: céu nublado, céu parcialmente nublado e céu aberto.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Local e Instrumentação*

Os dados de radiação solar foram cedidos pelo Laboratório de Radiometria Solar durante o ano de 2004. O Laboratório de Radiometria Solar está localizado no Campus de Botucatu da Universidade Estadual Paulista (22 54'S, 48 27'W, 716 m). Botucatu é uma cidade semi-rural cercada por cana-de-açúcar e plantações de eucalipto com 127,328 habitantes, poucas indústrias e da economia baseada em serviços (CODATO ET AL, 2008).

A irradiância solar global  $I_G$  foi medida por um piranômetro Eppley – PSP e a irradiância fotossinteticamente ativa  $I_{PAR}$  por um pireliômetro quântico Kipp Zonen. A Fig. 3 mostra os equipamentos de medidas utilizados no estudo. Os valores das irradiâncias solares foram monitorados por um sistema de aquisição de dados automático modelo Datalogger 23X da empresa Campbell Scientific Inc com frequência de varredura de 0,2Hz. Foram calculados os valores médios a cada 5 minutos e armazenados no formato  $W/m^2$ .



(a)



(b)

Figura 3. Aparelhos de medida de radiação solar. a) Piranômetro (global); b) Piranômetro quântico (PAR).

### *Controle de Qualidade*

A filtragem dos dados foi baseada nos critérios adotados por Kudish e Evseev (2008). 3,87% dos dados foram removidos devido ao desalinhamento, fios danificados, falta de eletricidade e valores de irradiância baixos nos horários próximos ao nascer e por-do-sol (baixa altitude solar). Após a filtragem dos dados, os valores das irradiâncias solares foram integrados para a partição de tempo diária, passando a serem chamados de irradiação solar ( $MJ/m^2$ ).

A transmissividade atmosférica  $K_T$  (razão entre as irradiâncias solares global e extraterrestre) foi calculada pela Eq. 1. Os critérios de classificação de céu baseados na transmissividade atmosférica  $K_T$  (LIU E JORDAN, 1960) estão apresentados na Tab 1.

$$K_T = \frac{I_G}{I_0} \quad (1)$$

Intervalo de $K_T$	Cobertura de céu
$0 < K_T < 1$	Condições Totais
$0 \leq K_T < 0,30$	Nublado
$0,30 \leq K_T < 0,55$	Parcialmente nublado
$0,65 \leq K_T < 1$	Aberto

Tabela 1. Intervalos da Transmissividade Atmosférica  $K_T$  e classificação de cobertura de céu.

As equações de estimativa foram desenvolvidas plotando-se a radiação solar fotossinteticamente ativa em função da radiação solar global e o desempenho dos ajustes foram verificados por meio do coeficiente de determinação  $R^2$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A radiação solar fotossinteticamente ativa é uma componente da radiação solar global e representa, segundo a literatura, de 44% a 52% da radiação global. Essa variação apresenta dependência local e sazonal e está intimamente ligado com os constituintes atmosféricos que promovem a atenuação do feixe radiativo para os comprimentos de onda do ultravioleta, fotossinteticamente ativa e infravermelho. A Figura 4 mostra a correlação entre a radiação solar fotossinteticamente ativa em função da radiação global.

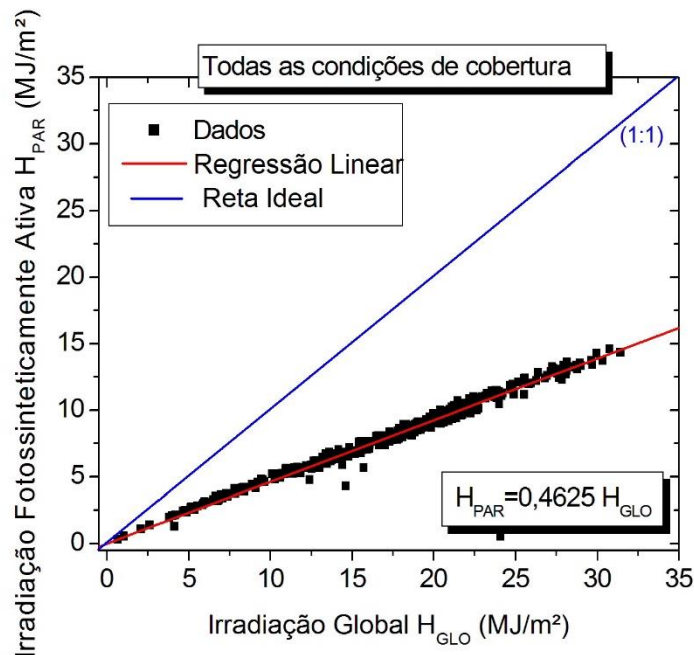


Figura 4. Equação de estimativa da radiação solar fotossinteticamente ativa em função da radiação global para todas as condições de cobertura de céu

Observa-se, pela figura 4, que para todas as condições de cobertura de céu, a radiação solar fotossinteticamente ativa representa 46,25% da radiação solar global. Esse valor é um valor médio, visto que contempla todas as condições atmosféricas, já que ao longo do ano, as concentrações de aerossóis, vapor d'água e nuvens é variável. A Figura 5 mostra a evolução temporal das radiações solares global e fotossinteticamente ativa.

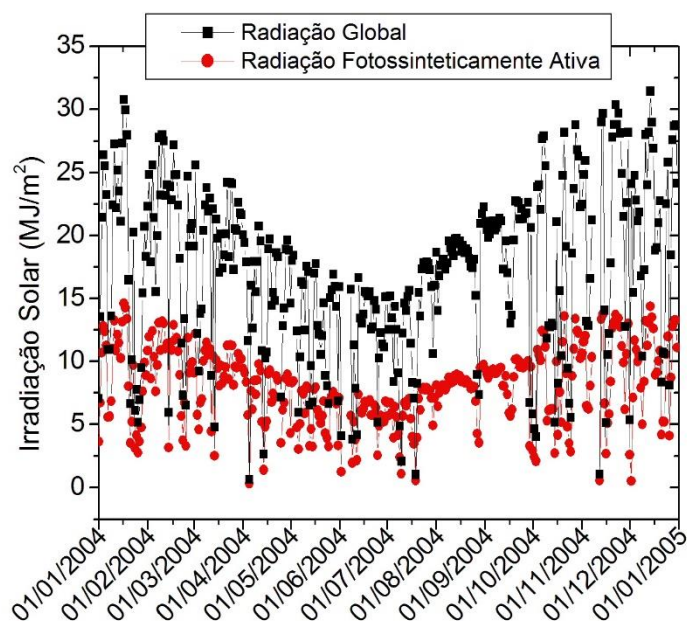


Figura 5. Evolução temporal das radiações solares global e fotossinteticamente ativa.

Em relação à evolução temporal, observa-se que no verão, que compreende os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, a diferença entre os valores das duas radiações é maior, indicando uma maior atenuação da radiação fotossinteticamente ativa. O verão em Botucatu é caracterizado por uma maior nebulosidade, o que pode ser responsável pela maior atenuação da radiação fotossinteticamente ativa. Portanto, foram propostas equações de estimativa para diferentes coberturas de céu para verificar o efeito da atenuação atmosférica sobre os valores da radiação solar fotossinteticamente ativa. A Figura 6 mostra a correlação entre a radiação solar fotossinteticamente ativa em função da radiação global para 3 coberturas diferentes de céu: cobertura de céu nublado, cobertura de céu parcialmente nublado e cobertura de céu aberto.

Para cobertura de céu nublado, a radiação fotossinteticamente ativa é 50,06% da radiação global. Para cobertura de céu parcialmente nublado, esse percentual é de 47,05% e para cobertura de céu aberto esse percentual é de 45,64%.

Observa-se uma diminuição da contribuição da radiação fotossinteticamente na composição da radiação solar global à medida que a cobertura de céu se torna aberto. Nesse sentido, verifica-se uma maior atenuação da radiação solar fotossinteticamente ativa com a ausência de nebulosidade. É provável que a presença de nebulosidade e, conseqüentemente de vapor d'água, promova um aumento da atenuação da radiação infravermelha e, desse modo, afetando a relação da radiação fotossinteticamente ativa com a radiação global, aumentando sua relação percentual na cobertura de céu nublado.

Em relação ao ajuste das equações de estimativa, todas apresentaram coeficiente de determinação superior a 97%.

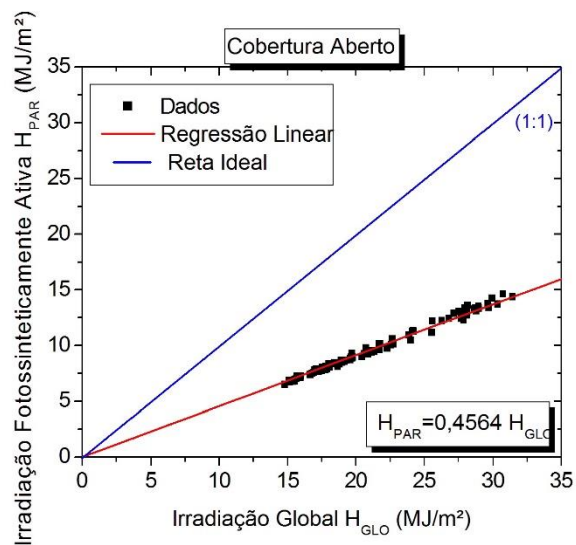
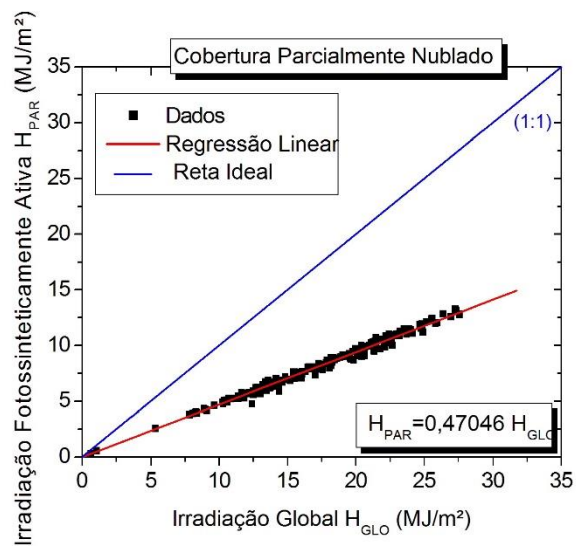
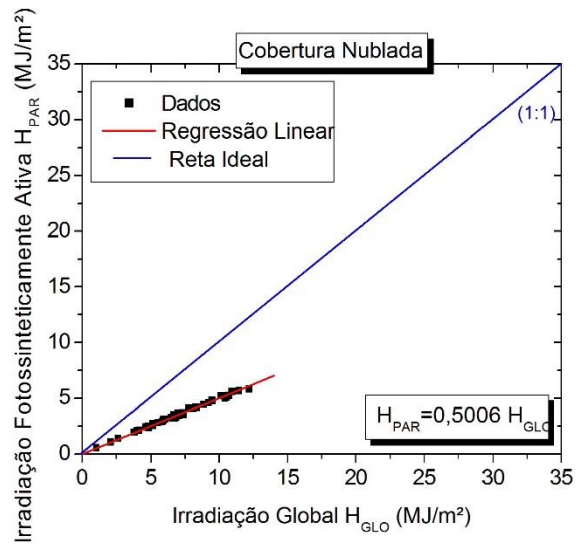


Figura 6. Equação de estimativa da radiação solar fotossinteticamente ativa em função da radiação global. a) cobertura de céu nublado. b) Cobertura de céu parcialmente nublado. c) Cobertura de céu aberto

## CONCLUSÃO

O estudo permitiu as seguintes conclusões:

- ✓ A partir do elevado valor do coeficiente de determinação  $R^2$  das equações de estimativa, a radiação solar fotossinteticamente é fortemente correlacionada com a radiação solar global.
- ✓ Para todas as condições de céu, a radiação solar fotossinteticamente ativa é 46% da radiação global.
- ✓ Os percentuais da radiação solar fotossinteticamente ativa em relação à radiação solar global apresentam dependência sazonal, com 50% para cobertura de céu nublado, 46,05% para cobertura de céu parcialmente nublado e 45,64% para cobertura de céu aberto.

## REFERÊNCIAS

- ALADOS I., FOYO-MORENO I., OLMO F. J., ALADOS-ARBOLEDAS L. Improved estimation of diffuse photosynthetically active radiation using two spectral models. *Agricultural and Forest Meteorology* 111, 1–12. 2002.
- ALADOS, I., FOYO-MORENO, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. For. Meteorol.* 78, 121–131. 1996.
- BAUERLE W. L., WESTON D. J., BOWDEN J. D., DUDLEY J. B., TOLER J. E. Leaf absorptance of photosynthetically active radiation in relation to chlorophyll meter estimates among woody plant species. *Scientia Horticulturae* 101, 169–178. 2004.
- ESCOBEDO, J. F., GOMES E. N., OLIVEIRA A. P., SOARES J. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy* 36, 169-178. 2011.
- GONZALEZ, J.A., CALBÓ, J. Modelled and measured ratio of PAR to global radiation under cloudless skies. *Agric. For. Meteorol.* 110, 319–325. 2002.
- GUEYMARD, C. A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance and photosynthetically active radiation at the Earth's surface. *Solar Energy* 43, 253–265. 1989.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 1983. 390 p.
- JACOVIDES, C.P., TIMVIOS, F., ASIMAKOPOULOS, D.N., STEVEN, M.D. Urban aerosol and clear skies spectra for global and diffuse photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 97, 21–31. 1997.
- MCCREE, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* 10, 443–453. 1972.
- PINKER, R. T., & LASZLO, I. Global distribution of photosynthetically active radiation as observed from satellites. *Journal of Climate*, 5, 56–65. 1992.
- PINTER, Jr. et al. Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Maryland, v.69, n.6, p.647–664, 2003.
- RUBIO M. A., LÓPEZ G., TOVAR J., POZO D., BATLLES F. J. The use of satellite measurements to estimate photosynthetically active radiation. *Physics and Chemistry of the Earth* n 30, 159–164, 2005.
- SKARTVEIT, A., OLSETH, J.A. Luminous efficacy models and their application for calculation of photosynthetically active radiation. *Solar Energy* 52 (5), 391–399. 1994.
- UDO, S.O., ARO, T.O. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. *Agric. For. Meteorol.* 97, 21–31. 1999.

- VAN LAAKE, P. E., & SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Mapping PAR using MODIS atmosphere products. *Remote Sensing of Environment*, 94, 554–563. 2005.
- WU, C., CHEN J M., HUANG N. Predicting gross primary production from the enhanced vegetation index and photosynthetically active radiation: Evaluation and calibration. *Remote Sensing of Environment* 115, 3424–3435. 2011.
- ZANETTI, S. S.; SOUZA, E. F.; CARVALHO, D. F. BERNARDO, S. Estimação de evapotranspiração de referência no estado do Rio de Janeiro usando redes neurais artificiais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2, p.174–180, 2008.

### **ESTIMATE EQUATION OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE SOLAR RADIATION FOR DIFFERENT SKY COVERAGE**

**Abstract:** The objective was to propose estimating equations of photosynthetically active solar radiation due to solar radiation for different sky covers. The global irradiance database and photosynthetically active 2004 was provided by the Solar Radiometry Laboratory Botucatu-UNESP. The estimating equations were obtained by linear regression to four different conditions: all sky coverage conditions; cloudy sky coverage; sky coverage and partly cloudy; open coverage. The performance verification of estimating equations was performed from the analysis of the R<sup>2</sup> determination coefficient. The results show different percentage of photosynthetically active solar radiation due to solar radiation for different sky covers: 46.25% for all sky coverage conditions; 50.06% for cloudy sky coverage; 47.05% partly cloudy sky and coverage; 45.64% for open coverage.

**Key words:** solar radiation, photosynthetically solar radiation, estimate equations, chlorophyll.